

大水深波浪制御構造物の水理特性と試設計

谷本勝利*・吉本靖俊**・岡 幸夫***

1. ま え が き

海洋空間の利用において、一般に最も障害となるのは台風や季節風によって生じる巨大な波浪である。そのため、これを制御し適度に静穏な海域を造成する技術は各種の利用分野に共通した基本的技術であり、合理的波浪制御技術の研究開発が海洋空間の有効利用促進に及ぼす効果は大である。これは巨大な波浪の発生が天然の地形によって抑えられている内湾が高密度に利用されている現実をみれば明らかであり、外海において波浪を制御することは新しく利用可能な内湾を創造することに相当する。こうした外海において巨大な波浪を制御し、適度に静穏な海域を造成するための構造物を波浪制御構造物と呼んでいる。我が国で一般的である混成堤は反射波が大であるとか、流れが阻害されるとかの水理特性が問題となるほか、大水深・大波浪条件では大断面となり、工費が著しく大となる難点がある。そのため、水理特性に優れ、しかも経済的な波浪制御構造物の開発が期待される場所である。この目的のため、本研究では海底設置型の二・三の透過性構造物を対象として反射、伝達波および波力の概略の特性を水理模型実験により明らかとし、その結果に基づき実海域を想定した試設計を行って、これらの構造物を実際に建設した場合にどの程度の規模、安全率となるかを検討した。

2. 対象とした構造

本研究で対象とした構造は後出の図-8~10にその一般図を示している水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造の3構造である。いずれも海底に直接設置する型式で通水性を有する。各構造の特徴、狙い等を以下に示す。

① 水平板付立体骨組構造：静水面あるいは水面下適当な深さに水平板を固定することによって防波効果が得られることはよく知られている。本構造はこの水平板の防波原理を主として活用したもので、これを立体骨組部

材で支え、さらに基部ケーソン上に固定した構造である。これにより、水平板の防波効果のほか立体骨組部材による若干のエネルギー消費が期待し得る。この構造は直立壁で波をとめるものでないため、水平波力が非常に小さく、流れをほとんど阻止しないという特徴を有する。

② 上部半円形断面構造：基部ケーソンの上に水平孔を有した通水部を設け、さらにその上の波あたりの厳しい水面付近を安定性の面で優れている半円形断面としたもので、背が高くても比較的狭い幅で安定性が保持できる構造を狙ったものである。つまり、半円形断面の外面に働く波圧の合力は円の中心を通るため、安定性を高める波力成分があるほか、転倒モーメントも小さいことにより比較的狭い幅で安定性確保が可能と期待される。

③ 透過壁式二重セル構造：基部ケーソンの上を二重円筒（セル）構造とし、静水面付近の外壁を透過性としたもので、円筒構造による材料の節約を図りつつ、水面付近での波力の緩和、遊水室による消波効果の発揮を狙った構造である。

3. 実験方法

(1) 実験条件

実験は現地水深として -50m を想定し、不規則波長水路（全長 163m, 幅 1m, 深さ 1.5m）で反射・伝達特性¹⁾および波力特性²⁾について行った。前者は有義波周期が 8~18s の不規則波、後者は周期 8~18s の規則波によるものである。また、実験縮尺は水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造に対しては 1/50、透過壁式二重セル構造に対しては 1/40 である。

対象とした実験水深および構造諸元を表-1に一括して示している。表中、 h は堤体設置水深、 B は堤体幅、 h' は基部ケーソン上面の深さ、 h_0 は天端高を表わし、 d' は構造によって水平板の深さ、半円形部下端の深さ、および二重セル透過部下端の深さを表す。また、 ε は透過部の開口率である。

(2) 波力の測定法

波力の測定には波圧計、歪みゲージ、および全波力測

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 防波堤研究室長
 ** 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 防波堤研究室
 *** 正会員 工修 港湾技術研究所昭和59年度研修員（飛島建設株式会社）

表-1 各構造の構造条件

構 造	縮 尺	h (cm)	B/h	h'/h	d'/h	h_c/h	ε	備 考
水平板式 立体骨組構造	1/50	100	1.00	0.60	0.075	0.10	0.58*	*構造 投影開口率
上部半円形 断面構造	1/50	100	0.80	0.50	0.20	0.20	0.25	反射伝達実験 波力実験
				0.55	0.25	0.15	0.25	
透過壁式 二重セル構造	1/40	125	0.80	0.60	0.20	0.20	0.25	

定装置を用いた。このうち、全波力測定装置は基部ケーソンより上の上部構造（基部ケーソン上面を含む）に働く全水平力 (F_{FXT})、全鉛直力 (F_{FZT})、モーメント (M) の3分力を測定するもので、本実験では基部ケーソン内に4台の2分力検出器を設置し、これに上部構造を固定した。本報告ではこれらの測定値のうち水平波力と鉛直波力について後述するが、次式のように波力の作用方向の投影面積で除した平均波力強度のかたちで表示する。

$$f_{FXT} = F_{FXT} / \{(h' + h_c)l\} \quad (1)$$

$$f_{FZT} = F_{FZT} / (Bl) \quad (2)$$

ここに、 l は水路幅方向の長さである。また、 f_{FXT} は平均水平波力強度、 f_{FZT} は鉛直平均波力強度であり、それぞれの波の進行方向、および上向きに働くときを正とする。

4. 反射および伝達率

図-1 は横軸に有義波周期 ($T_{1/3}$, 現地量) をとり、3 構造の反射率 (K_R)、伝達率 (K_T) を示したものである。反射率は合田ほかによる入・反射波の分離計算法に

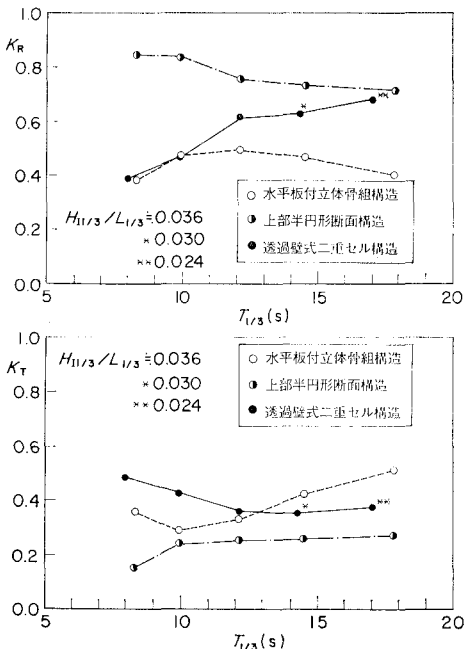


図-1 各構造の反射率および伝達率

より、伝達率は分離入射有義波高に対する伝達波の有義波高の比によって、それぞれ算定している。入射波の波形勾配が 0.036 (実験上の制約のため一部異なる) の条件であるが、反射率は上部半円形断面構造が最も大きく、 $T_{1/3}=8\sim 18$ s の範囲で 0.7 以上である。

逆に最も小さいのは水平板付立体骨組構造で、0.5 以下であり、透過壁式二重セル構造は周期の短い条件では水平板付立体骨組構造、長い条件では上部半円形断面構造に近い。

一方、伝達率は上部半円形断面構造が最も小さく、 $T_{1/3}=8\sim 18$ s の範囲で 0.28 以下である。水平板付立体骨組構造では $T_{1/3}=10\sim 11$ s で極小となる変化を示し、この極小条件で約 0.3 であるが、 $T_{1/3}=18$ s 付近では 0.5 以上となる。透過壁式二重セル構造では周期の短い $T_{1/3}=8$ s で約 0.5 とやや大きいけれども、 $T_{1/3}=12\sim 18$ s の周期の長い条件では 0.4 以下である。

以上は特定の構造諸元での結果を示したものであるが、特に伝達率は構造条件によって大きく変化する。たとえば、水平板付立体骨組構造では水平板の幅 (波の進行方向の長さ) のほか、その設置深さが非常に重要な諸元となる。また、上部半円形断面構造や透過壁式二重セル構造では開口部の範囲や開口率、および天端高が重要な諸元である。これらの諸元による反射および伝達率の変化については文献 1) を参照されたい

5. 波力特性

(1) 波力の時間変化

図-2~4 は各構造に現地換算値で周期 15 s、波高 (H) 15 m (水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造)、あるいは 12 m (透過壁式二重セル構造) の規則波が作用したときの波力の時間変化を例示したものである。図中、 f_{FZT} , f_{FXT} は前述したように基部ケーソンより上の部分に働く鉛直および水平の平均波力強度であり、 p_{CFP} , p_{CBP} は基部ケーソンの前壁および後壁に働く波圧強度である。図中には、これらの正および負のピークを MAX で表示し、その同時の値を縦線で示してある。そのほか、各代表的部材に働く波力や波圧の時間変化を示しているが、以下各構造ごとにこれらの特徴を述べる。

① 水平板付立体骨組構造 (図-2)

f_{FZT} は正 (上向き) のときと比べて負のときの方が作用時間が長く、かつピーク値も $-0.28w_0H$ (w_0 : 水の単位体積重量) と絶対値が大きい (以下、負のピーク値の大小は断わりなしに絶対値に対して述べる)。 f_{FXT} は正 (波の進行方向)、負ともにそのピーク値が小さく、しか

も正のピーク時は f_{FZT} の負のピーク時とほぼ一致している。つまり、水平板付立体骨組構造の上部構造に働く波力は水平力が小さく、かつ鉛直下向きの力が卓越することが知られる。

一方、基部ケーソンの前後壁に働く波圧は前壁に働く波圧 (p_{CFP}) が卓越しており、正、負のピーク値は $0.39w_0H$ 、 $-0.43w_0H$ で、負圧すなわち引き波時の波圧がやや大きい。これは他の構造でも認められ、透過性構造物の場合の特徴のようである。

図中、下の三つの時間変化はそれぞれ水平板のみに作用する平均波力強度 (f_{HBT} : 上向きを正)、水平板上面に作用する平均波圧強度 (p_{HBU} : 下向きを正) および下面に作用する平均波圧強度 (p_{HBD} : 上向きを正) である。 p_{HBU} と f_{FZT} は符号の定義によって正、負が逆

になっているけれども、同じ方向でみれば位相、ピーク値ともにはほぼ一致しており、水平板下面に働く波圧と基部ケーソン上面に働く波圧はほぼ相殺していることが知られる。

② 上部半円形断面構造 (図-3)

この場合には、 f_{EXT} が f_{FZT} より卓越するけれども、 f_{EXT} が正のときには f_{FZT} が負で下向きの波力が作用する。また、基部ケーソンの前壁に働く波圧 (p_{CFP}) は引き波時が明らかに卓越している。

図-3 の下の二つの波力波形は半円形曲面部のみ (底面を除く) に作用する波力の鉛直成分の投影面積に対する平均波力強度 (f_{CRZ} : 上向きを正)、および水平成分の投影面積に対する平均波力強度 (f_{CRX} : 進行方向を正) である。 f_{CRZ} と f_{FZT} はほぼ一致しており、上部構造に働く波力の鉛直下向き成分は半円形曲面部に働く波力によるものであることが知られる。

③ 透過壁式二重セル構造 (図-4)

この場合の上部構造、および基部ケーソンに働く波力や波圧も ② の上部半円形断面構造の場合とはほぼ同様であるが、 f_{EXT} と p_{CFP} の位相差がやや小さく、また f_{FZT} に正の値が生じるなどの違いがある。なお、本上部構造において鉛直方向の波力成分が生じるのは、基部ケーソン上面および遊水室床版に波圧が働くためである。

図-4 の下の三つの波圧波形は外部セル下段不透過壁の静水面下 $0.5h$ の深さで円周に働く波圧合力を直径で割って求めた平均波力強度 (f_{FQX})、同上段透過部のほぼ静水面位置での歪みゲージによる測定値から同様に求めた平均波力強度 (f_{FSX})、および内部セルの静水面下 $0.1h$ の深さでの波圧合力を内部セルの直径で割って求

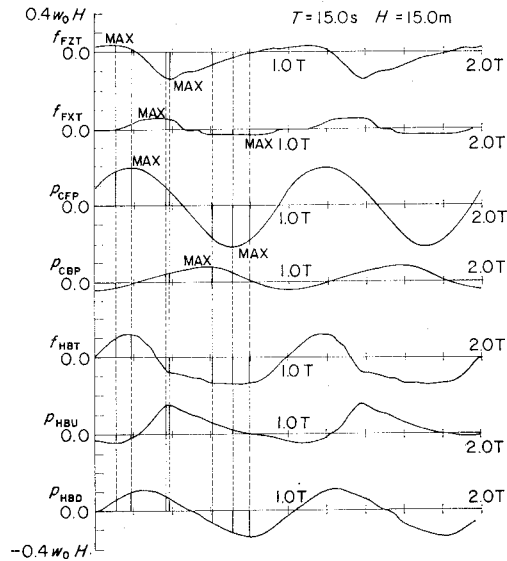


図-2 水平板付立体骨組構造の波力波形

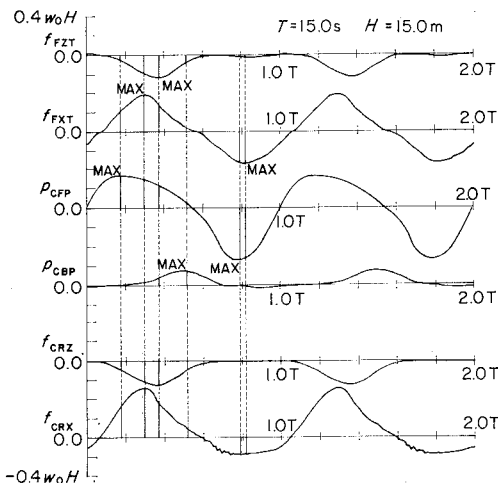


図-3 上部半円形断面構造の波力波形

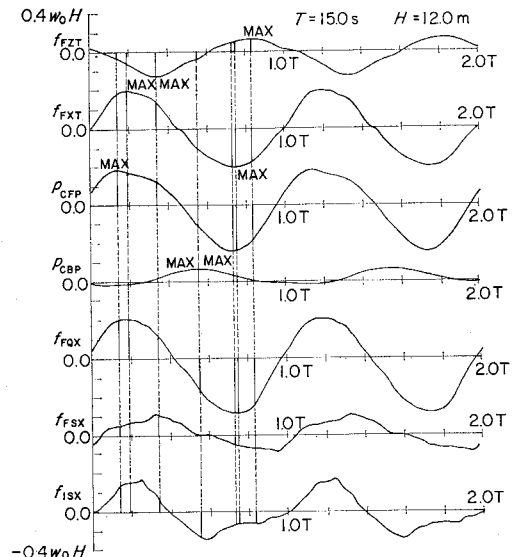
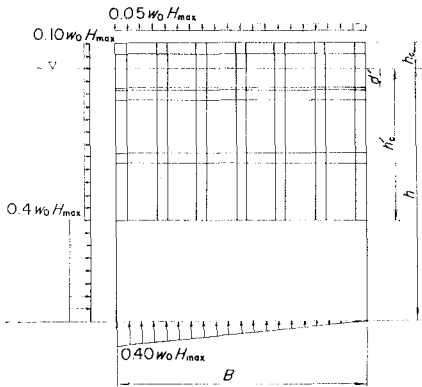


図-4 透過壁式二重セル構造の波力波形

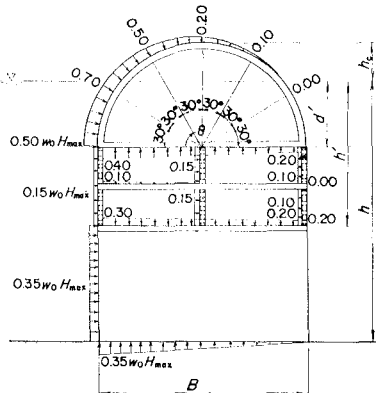
めた平均波力強度 (f_{ISX}) であり、いずれも波の進行方向を正としている。ただし、 f_{FSX} は部材の実質部分に働く平均波力強度であり、 f_{ISX} は内部セルの直径に対する平均波力強度である。したがって、 f_{FSX} を 0.75 倍および、 f_{ISX} を 0.5 倍にして、 f_{FQX} に加えて平均したものが f_{FXT} にほぼ対応することになるが、 f_{FXT} は特に正のとき f_{FQX} にほぼ一致しており、 $0.75f_{FSX} + 0.5f_{ISX} \approx f_{FQX}$ であることが知られる。

(2) 同時波力分布

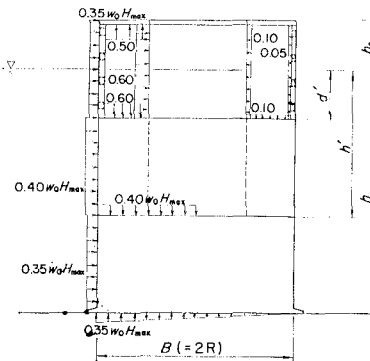
図—5~7 は (1) と同じ波浪条件に対し、水平板付立体骨組構造については p_{CFP} が正のピークのとき、他の構造については f_{FXT} が正のピークのときの同時波力分布を例示したものである。ただし、本実験では基部ケーソン底面に働く揚圧力は測定していないけれども、前・後端で基部ケーソン前・後壁に働く波圧強度に等しい揚圧力強度を与え、その間を直線で結んだ分布としてある。また、水平板付立体骨組構造の上部構造に働く波力は分布を正確に与えることが困難であるので、前出の式 (1), (2) で定義した f_{FXT} と f_{FZT} をそのまま示している。



図—5 水平板付立体骨組構造の同時波力分布



図—6 上部半円形断面構造の同時波力分布



図—7 透過壁式二重セル構造の同時波力分布

6. 試設計

(1) 試設計条件

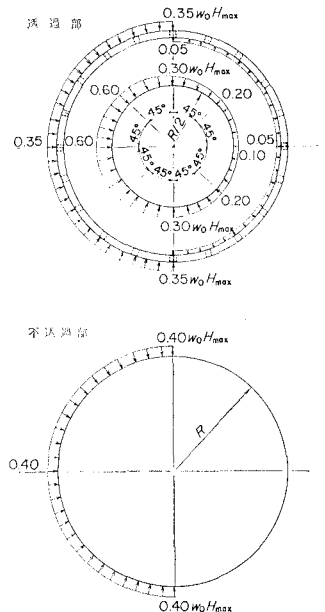
以上のような特性を有する 3 構造について、以下の条件を想定し試設計を行った。ただし、波力条件は前出の図—5~7 の位相時のほか構造物にとって危険となりそうな 2~3 種の位相に対する同時波力分布を与えている。

- ① 建設想定地点：海岸線より 15km 沖合の水深—50m 海域
- ② 想定規模：延長 5km, 工期 10 年
- ③ 潮位：H.W.L. +1.5m, L.W.L. ±0.0m
- ④ 設計波浪： $T_{1/3}=14.0s$, $H_{1/3}=9.0m$,
 $H_{max}=16.2m$
波向 構造物法線に直角
- ⑤ 地盤：良好な砂質地盤
- ⑥ 伝達率：設計波浪に対して 0.4 以下

(2) 試設計結果

試設計で決定した 3 構造の主要な諸元および安定計算結果等を図—8~10 および表—2 に示す。

水平板付立体骨組構造 (図—8) では、波浪制御の面から堤体幅 B を 50m に設定している。作用波力が小さいため基部ケーソンを中詰なしの水張りのままとしても安定である。しかし、水平板を支える立体骨組構造の部材強度の確保が問題であり、本試設計では鉛直柱を直径と厚さがそれぞれ、上の 3 層については、1.5m, 0.32m, 最下層については 1.7m, 0.52m の円筒とし、また水平梁は辺長 1.5m, 厚さ 0.3m の角筒とした。このうち鉛直柱はプレストレストコンクリート部材である。水平板は板厚が 0.5m で、基部ケーソンとともに鉄筋コンクリート製で



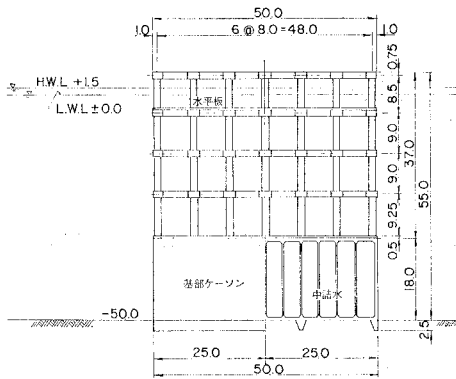


図-8 水平板付立体骨組構造一般図

表-2 試 設 計 結 果

構造の種類	構造諸元	堤体重量 (1m 当り)		安 定 計 果	
		空 中 時 (コンクリート部材)	水 中 時 (中詰砂、 浮力考慮)	滑 動	転 倒
水平板付 立体骨組構造	堤 体 幅	50m			
	法線方向幅	50m			
	堤体全高	55m			
	基部ケーソン高	18m			
上部半円形 断面構造	堤 体 幅	35m			
	法線方向幅	50m			
	堤体全高	58m			
	基部ケーソン高	20m			
透過壁式 二重セル構造	堤 体 幅	40m			
	法線方向幅	40m			
	堤体全高	57m			
	基部ケーソン高	20m			
		1009 tf/m (9888 kN/m)	592 tf/m (5802 kN/m) 中詰砂不要	1.27	2.46
		955 tf/m (9359 kN/m)	1011 tf/m (9908 kN/m)	1.60	1.74
		864 tf/m (8467 kN/m)	945 tf/m (9261 kN/m)	1.24	1.62

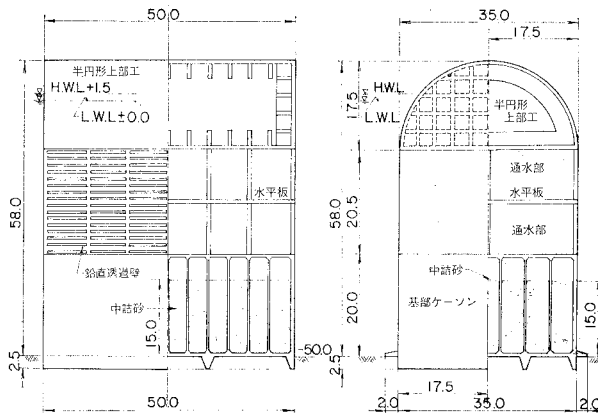


図-9 上部半円形断面構造一般図

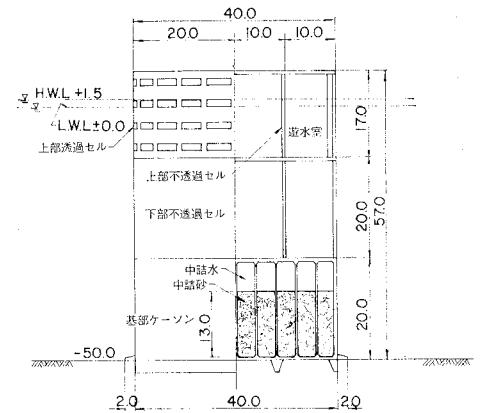


図-10 透過壁式二重セル構造一般図

ある。

上部半円形断面構造 (図-9) では堤体幅を 35m としている。基部ケーソン内は 80% の中詰をしているが、これは端趾圧を低減するためであり、滑動、転倒に対しては充分安定である。このときの端趾圧は 2.0m のフーチングを設けても 81 tf/m² (0.79 MPa) と大きく、今後の課題である。本構造の半円形部の曲面壁および同側壁リブはプレストレストコンクリート部材である。

透過壁式二重セル構造 (図-10) では堤体幅を 40m としており、滑動、転倒に対しては基部ケーソン内を 70% 中詰した状態で安定であるが、端趾圧は 72 tf/m² (0.71 MPa) と大きい。また、下部不透過セルおよび上部透過セルはプレストレストコンクリート部材である。

施工性に関しては、技術的な難易の差はあっても 3 構造とも現在の技術で施工可能である。

建設工費では水平板付立体骨組構造が最も高く、続いて上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造である。

7. あとがき

以上に示した試設計結果に基づき、かつ反射、伝達特性として常時の短周期波に対しては反射率が小さく、異常時の長周期波に対しては伝達率が小さい条件を考慮すると、透過壁式二重セル構造が最適な波浪制御構造物と考えられる。

本報告では地盤支持力の検討を行っていないが、これについては今後の検討が必要であり、また、端趾圧の低減のために基部ケーソンを台形にするとか、バットレス構造を採用するとか、構造上の改良、合理化についての検討もさらに続ける必要がある。

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄: 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究 (その 1), 港湾技研資料 No. 516, 39 p., 1985.
- 2) 谷本勝利・吉本靖俊・岡 幸夫: 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究 (その 3), 港湾技研資料, No. 543, 1985.